长江经济带湖泊环境演变与保护、治理建议

羊向东[1*]　董旭辉[2]　陈　旭[3]　王　荣[1]　王　倩[1]　林　琪[1]　徐　敏[1]

1 中国科学院南京地理与湖泊研究所 湖泊与环境国家重点实验室 南京 210008
2 广州大学 地理科学与遥感学院 广州 510006
3 中国地质大学（武汉） 地理与信息工程学院 武汉 430074

摘要　长江经济带湖泊主要集中分布在我国西南横断山区和东部江淮流域洪泛平原区。自然环境的巨大差异和经济发展的不平衡，导致了长江经济带东、西部湖泊不同程度的生态环境问题。全面改善长江经济带湖泊水环境，对推动长江经济带可持续发展有着重要的现实意义。在缺乏长期监测数据的情况下，过去湖泊环境变化的研究可为当前的保护与治理提供历史借鉴。文章剖析了长江经济带东、西部湖群的环境问题，总结出我国西南地区高海拔山地湖泊水质环境明显好于低海拔的断陷湖泊，江淮地区浅水湖泊水环境质量总体比西南地区的更差；通过沉积记录的多指标研究，从长期演化的角度，重点揭示了长江经济带东、西部两个区域不同类型湖泊过去百年来环境演化的阶段性特征，及其对气候、水文和营养变化的响应机理；查明了近年来湖泊生态系统退化原因；讨论了古湖沼研究在生态系统修复参考目标设定、治理效果评估、水生植被恢复过程中群落结构优化、生态系统临界转换预警、生态安全评估等方面的应用价值。最后，针对不同区域湖泊面临的环境问题，提出了相应的保护及治理对策。

关键词　长江经济带，湖泊环境演化，生态系统退化，过程与机制，保护与治理对策

DOI　10.16418/j.issn.1000-3045.20200429004

长江经济带覆盖我国西南至东部沿海 9 省 2 市，自然条件分异明显。区域内湖泊众多，成因类型多样，其中面积大于 1 km^2 的湖泊超过 660 个，大于 10 km^2 的湖泊 151 个（图 1），多集中分布于我国西南横断山区、长江中下游和淮河流域[1]。长期以来，这些湖泊在保障供水、流域经济发展、蓄洪防灾、旅游休闲等方面发挥着重要服务功能。近几十年来区域内湖泊生态环境出现了不同程度的退化，尤其是受人

*通讯作者
资助项目：国家自然科学基金重点项目（41530753），国家自然科学基金创新研究群体项目（41621002）
修改稿收到日期：2020年7月28日

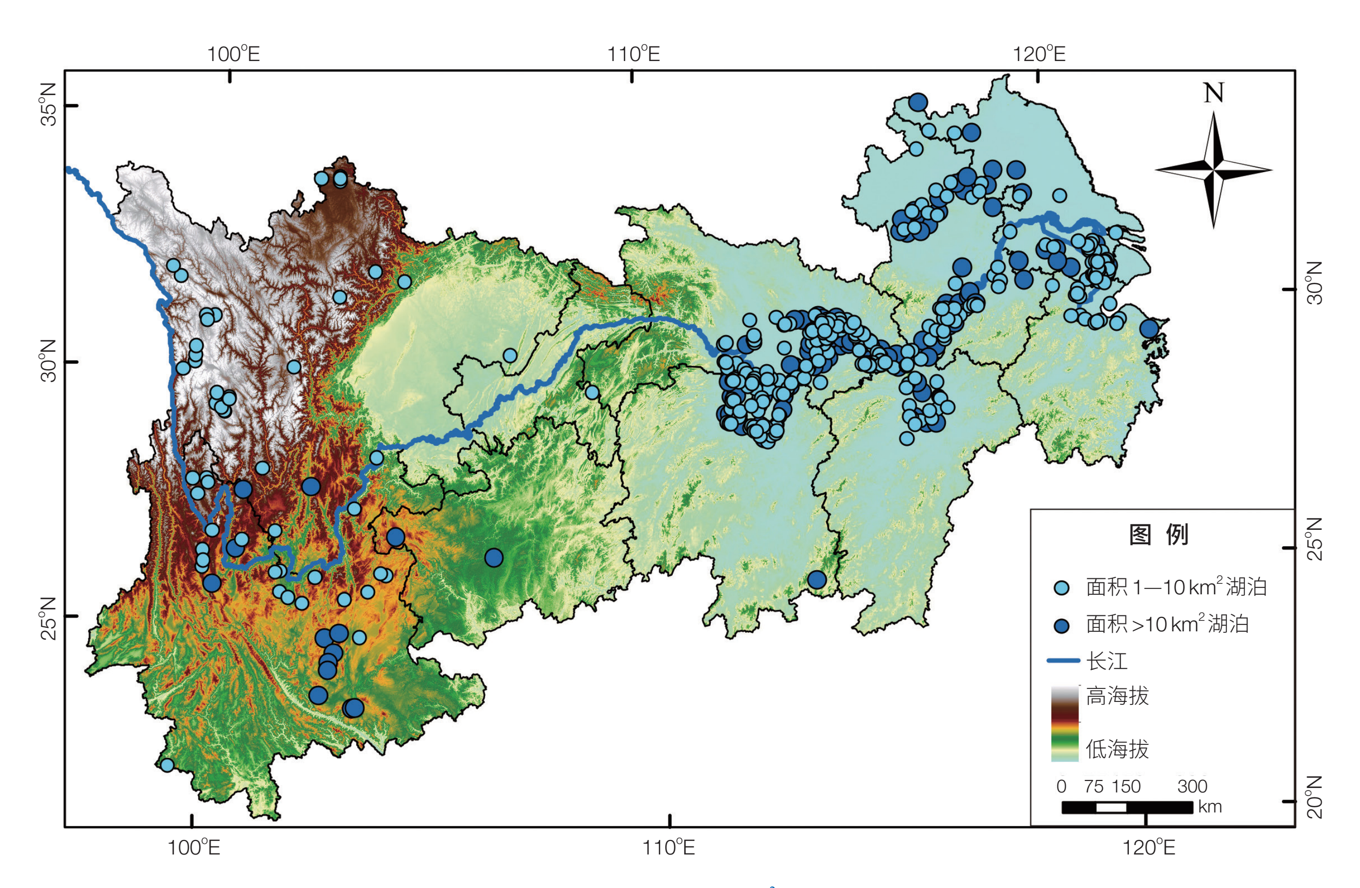


图 1　长江经济带面积大于 1 km² 的湖泊分布图

类活动干扰强烈的一些大型湖泊和中小型城市湖泊退化尤为严重。这些退化湖泊的共同特点是生物群落结构趋于简单化，生态系统完整性遭破坏，生物多样性减少，生态服务功能退化[1]。湖泊退化问题已威胁到流域甚至区域的生态安全和可持续发展。

长江经济带湖泊一直是国家水环境治理的重点，此前已着重开展了太湖、巢湖、滇池和洱海水体污染和富营养化防治工作。尽管投入力度很大，但治理成效较慢。事实上，湖泊生态系统现状是长期演化的结果，这就需要我们了解湖泊历史，分析湖泊退化的时间和演化过程，揭示关键驱动要素与机制，厘清气候变化和人类活动干扰对湖泊生态系统的影响程度；在此基础上，提出湖泊保护和治理的对策，包括：治理的参考目标、治理效果的评估、生态质量评价及生态灾变预警等。

在缺乏长期监测数据的情况下，湖泊沉积记录研究是解析湖泊长期演化规律的唯一途径。本文根据对长江经济带湖泊近20年来的古湖沼学研究成果，从湖泊生态系统长期演化的视角，提出具有针对性的长江经济带湖泊保护和治理对策。

1 长江经济带湖泊分布和环境现状

1.1 湖泊分布和成因类型

长江经济带东、西部湖泊分布及成因类型具有明显的区域特色。

（1）长江经济带西部湖群位于我国西南横断山区。该区域大、中型湖泊均位于较低海拔，多为构造断陷湖泊（如云南九大湖泊），系青藏高原隆升伴生的产物。而在山地不同海拔处则分布着众多的小型湖泊，主要以冰川遗迹湖和堰塞湖为主。冰川遗迹湖系由末次盛冰期结束冰川融化形成的残留湖，多位于高海拔树线附近（海拔 3 800—4 300 m）；堰塞湖多位于

深切峡谷地带，由地震滑坡堵塞沟谷形成，其成湖时间不定。例如：2008 年的汶川特大地震，滑坡形成的堰塞湖就多达 257 个[2]；而位于川西康定县的木格措，形成于距今 9 000 年前后的地震滑坡[3]。目前，对这些小湖泊尚缺乏系统的排查和统计。

（2）长江经济带东部湖群位于我国江淮流域洪泛平原区。该区域面积超过 1 km^2 以上的湖泊近 580 个，大于 100 km^2的湖泊有 27 个；我国的五大淡水湖泊（鄱阳湖、洞庭湖、太湖、洪泽湖和巢湖）都分布于此。这些湖泊多形成于晚冰期和全新世，成因类型包括河成湖、牛轭湖等，少数下游湖泊（如太湖流域湖泊）还与海岸带变迁有关[4,5]。

1.2 主要生态环境问题

区域地理环境的差异和经济发展的不平衡，导致了长江经济带东、西部湖泊不同的生态环境问题。近期，对我国西南山地（高海拔）近 70 个小型湖泊水环境进行调查的数据表明[6]，大多数湖泊保持在贫营养水平，湖水总磷（TP）普遍低于 25 μg/L，总氮（TN）在 0.10—0.35 mg/L，浮游藻类生物量极低，这与高山湖泊远离人类活动直接影响有关。同期调查的 47 个西南低海拔湖泊水质数据显示（图 2a）：大多数湖泊处于中营养和富营养状态，以洱海、滇池、星云湖等湖泊为代表，水质现状堪忧，藻类生物量高；仅约 28% 的湖泊处于贫营养状态，如泸沽湖和抚仙湖等。

江淮地区浅水湖泊，水环境质量总体比我国西南地区差。2016—2017 年，对近 70 个湖泊的四季水质调查资料显示（图 2b），超过 93% 的湖泊已经处于富营养状态。2003—2004 年和 2016—2017 年相同湖泊（共 33 个）的四季水质调查数据对比发现，28 个湖泊（占比 85%）水质进一步变差，只有少数湖泊营养状态指数（TSI）略有降低（图 3）。太湖监测数据显示[7]，2007—2017 年湖水 TN 浓度下降，但仍然超过 2 mg/L；TP 小幅下降后又上升，整体处于较高水平（~0.1 mg/L），藻类生物量（Chl-*a*）逐年上升，蓝藻爆发面积并无减少趋势。

除水质恶化外，自 1950 年以来，由于大规模围湖造田，仅长江中下游地区湖泊面积和库容就分别减少约 1.3×10^4 km^2 和 5×10^{10} m^3，消亡的湖泊数超过 1 000 个[1,4]。同时，20 世纪 50—70 年代大量水闸修建阻碍了江湖水系自然连通，改变了江湖之间物质和能量交换关系[8]。此外，研究区湖泊还存在外来种入侵、藻毒素蓄积和三峡工程运行后通江湖泊生态水文过程改变等诸多问题[9,10]。

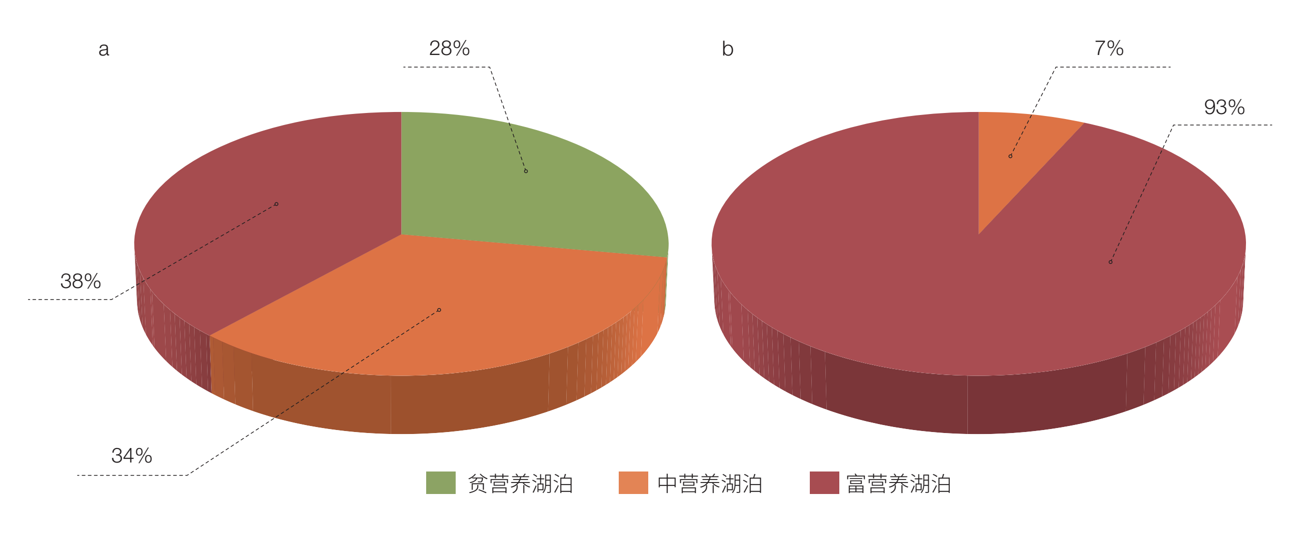


图 2 长江经济带典型湖群水环境状况调查结果
（a）47 个西南低海拔湖泊；（b）70 个江淮地区浅水湖泊



图 3 江淮地区 33 个浅水湖泊两次水质调查结果对比

2 过去百年来长江经济带湖泊环境变化与生态系统退化原因

湖泊沉积物中保存了丰富的生物和理化环境信息，可以通过沉积岩芯提取和多指标分析，重建过去生态环境演化的历史。针对长江经济带湖泊环境问题，许多研究者对长江经济带东、西部湖泊开展了近现代环境过程的重建工作，在数年至 10 年时间分辨率上，揭示了长江经济带不同类型湖泊生态环境演化的阶段性特征，探讨了全球变化和日益增强的人类干扰背景下，湖泊生态系统退化的原因。

2.1 长江经济带西部湖泊

我国西南横断山区是全球生物多样性最为丰富的地区之一。尽管位于高海拔的山地湖泊很少受到人类的直接干扰，但是近百年来，人类活动仍通过大气污染沉降等间接方式影响了高山湖泊生态系统[11,12]。Hu 等[13]通过对多个高山湖泊的古生态数据集成分析，获得了区域生态变化趋势，并对比了近百年来区域大气氮沉降、粉尘沉降、温度等变化，揭示出大气沉降对高山湖泊生态环境的影响程度已经超过气候变化的影响。但不同湖泊的响应存在明显差异，流域植被、土壤稳定性、溶解有机物的输入对湖泊生态系统起着一定的调节作用。

在较低海拔，沉积记录的分析显示人类活动的持续干扰已导致近几十年该区域湖泊生态系统普遍偏离自然演化的轨迹。泸沽湖多指标变化显示，20 世纪 50 年代以来，流域侵蚀逐渐加强，且伴随着营养输入的增加，以及藻类的微弱变化；20 世纪 80 年代流域侵蚀达到峰值，入湖营养快速增加，底栖动物群落演替明显，藻类增长迅速，出现富营养化特征；20 世纪 90 年代后期，深水层溶氧环境进一步变差，硅藻群落更替明显。这些变化的阶段性在抚仙湖、洱海、程海、星云湖等湖泊沉积记录中均有反映[14-17]。其趋势的一致性表明，在气候和人类活动影响下，流域土壤侵蚀加强导致的营养盐输入是西南湖泊生态系统退化的重要原因。

2.2 长江经济带东部湖泊

以长江中下游浅水湖泊为例，该区湖泊历史时期与长江保持着畅通的水力联系，两者之间的能量流、物质流和生物流不停交换，形成了自然的江湖生态系统。来自梁子湖、龙感湖、巢湖等多个湖泊的古湖沼学证据显示，1950 年前，该区域湖泊换水周期短，水体细颗粒悬浮物质和营养物质易随出水河流排出；开阔湖区的硅藻以适应流水环境的颗粒直链藻（*Aulacoseira granulata*）占绝对优势；水生植被多以清水型沉水植物类型组合，如小茨藻（*Najas minor*）、轮藻（*Chara* sp.）、密刺苦草（*Vallisneria denseserrulata*）等为特征[18]。然而，20 世纪 50—60 年

代以来的围垦和闸坝建设阻隔了江湖水力连通，形成半封闭的相对静水环境；泥沙淤积明显加快，水体细颗粒悬浮物质增多，沉积物中营养物质积蓄量增加，水体出现富营养化特征。1980 年以来，西太湖和巢湖等湖泊还经历了再次的富营养化加重过程，水体 TP 浓度明显增加，开阔水域水生植物消失，硅藻以富营养种类占绝对优势，湖泊演变为藻型生态类型。

Chen 等[19]从时间序列上定量解释了营养、水文和气候对湖泊生态系统的影响机理。以硅藻群落演替为例，1960 年前后的群落演替主要受水文驱动影响；1980 年前后的群落演替，与营养持续增加有关，并且增温对硅藻生态也有显著影响，可能加剧了巢湖内源污染释放的风险。不同于江湖阻隔的湖泊，通江湖泊，如洞庭湖和鄱阳湖的富营养化发生时间相对较晚[20,21]，并受到三峡大坝工程的显著影响。2003 年以来，三峡工程运行后，出入湖径流量和输沙量发生明显变化，直接影响湖泊换水周期和湖泊富营养化趋势。

目前，在长江中下游地区仍有相当多湖泊处于水生植物占优势的草型状态。与藻型湖不同，这些草型湖在 1980 年后生态并没有出现明显转变，反映了这些湖泊生态系统在应对外力驱动时保持了较高的弹性。然而，在高强度的人类活动持续干扰下，未来可能存在由草型向藻型转变的生态风险。

3 湖泊生态与环境本底特征

湖泊生态修复的最终目的，就是要将受损的生态系统尽量恢复到人类干扰前或接近人类干扰前的生态状况，即本底环境，从而实现水质和生态质量的根本好转[22]。在普遍缺乏历史监测记录的情况下，古湖沼学方法可以帮助获得干扰前湖泊的生态本底特征。这种方法已被欧盟水框架管理委员会（WFD）推荐使用，我国环境保护部发布的《湖泊营养物基准制定技术指南》（2017 年）也将该方法作为一种重要的手段。

3.1 长江经济带东部浅水湖泊营养本底

水体富营养化是长江经济带东部湖泊最主要的水环境问题。已有研究基于该区域大量湖泊现代硅藻、摇蚊和水质数据调查，揭示出湖泊 TP 是影响不同生物群落分布的关键环境要素，据此分别构建了硅藻、摇蚊与湖水 TP 的转换函数模型[23,24]，并成功用于研究区湖泊历史时期水体营养变化的定量重建中。结果表明，该区域湖泊水体具有较高的 TP 本底值（平均在 50 μg/L 左右）（图 4），处于中-中富营养界限附近[25]。这说明在亚热带季风气候和早期人类活动背景下，该区域湖泊的营养负荷较高，削减空间有限。

3.2 长江经济带东部浅水湖泊生态本底

生物体对环境变化响应敏感，且能提供一个更综合的水环境状况测度，因此基于生物群落制定基准环境有着显著优势。Dong 等[25,26]利用“顶-底”法对长江中下游 10 个湖泊中沉积硅藻的现代群落（表层沉积物）及本底群落（沉积柱底部样品，约 1850 年）进行了研究，发现 19 世纪 50 年代前后的硅藻群落主要以颗粒直链藻及附生-底栖种为主。这说明其江湖连通性较好、营养水平较低、水草较多的生态特征，可作为该区域湖泊治理的生态本底。进一步，利用生态距离，从现代湖泊数据库中寻找到与本底特征相似的湖泊，作为受损湖泊生态修复的参考目标。

浅水湖泊生态治理的一个重要手段是水生植被

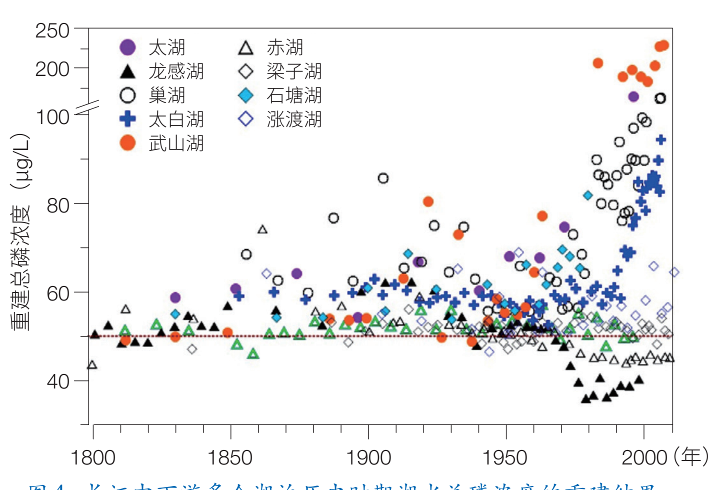


图 4　长江中下游多个湖泊历史时期湖水总磷浓度的重建结果

修复，但由于缺乏对历史过程了解，现有的干预式治理往往存在盲目性，很难有序地恢复过去植被群落。Zhang 等[18]通过重建湖北梁子湖水生植被演替历史，得出过去 100 年来，该湖水生植被群落由植株较低、指示清水环境的种类（如轮藻和小茨藻），向植株较高、耐浊水环境的眼子菜属（*Potamogeton*）、金鱼藻（*Ceratophyllum demersum*）和穗状狐尾藻（*Myriophyllum spicatum*）等种类演替。在多个典型湖泊（如太湖、太白湖等）水生植物记录的分析基础上，研究发现这些湖泊水生植被演替的阶段性特征，并提出了逐步优化水生植物群落结构的生态修复策略[27]。

4 湖泊生态系统灾变早期预警信号

近年来，富营养浅水湖泊藻类的异常增殖，以及内源营养盐释放等因素导致的严重生态灾害后果，已引起学术界对临界转换（或稳态转换）理论研究的浓厚兴趣。以 Scheffer 等[28]为代表的生态学家通过大量的控制和模拟试验，在生态系统对驱动力非线性响应、临界转换早期信号提取等方面取得重要进展，并提出临界放缓理论可以用于指导生态系统弹性恢复的管理。然而，由于没有得到自然湖泊数据的验证，基于理论模型获得的灾变预警指标备受争议。

Wang 等[15]基于洱海古生态数据，诊断出时间序列上生态系统的临界转换特征，发现临界转换前系统状态频繁波动于不同稳态之间，表现为“闪烁（flickering）”特征，而不是临界放缓特征；推导出的临界转换早期预警信号（如状态变率的升高和自相关性的下降等）也不同于来自理论模型的结果。进一步，该研究基于沉积钻孔多指标和监测数据的综合分析，提出入湖营养盐驱动下“藻类-底部溶氧-沉积物营养释放”正反馈作用的不断加强是临界转换发生的根本原因[15]。

为获得更多证据，研究人员对长江经济带多个湖泊的古生态数据进行了分析，利用突变点检测手段，发现长江中下游湖泊普遍存在 2 种突变模式，分别对应于 20 世纪 50—60 年代和 20 世纪 80—90 年代的生物群落演替的时间点。第一种模式是生态系统线性响应水文突变的结果，属于驱动力主导的系统突变模式；第二种模式是持续的营养富集情况下，生态系统结构调整引起的突变，属于临界转换模式，如巢湖和太湖[29,30]。我国西南地区除洱海外，程海和阳宗海等湖泊也在 1990 年后发生了临界转换[16]。尽管上述湖泊发生临界转换的时间不同，但都导致了生物多样性降低，生态系统趋于单一化和同质化。研究认为，对外力驱动的突变模式，湖泊生态系统可以随驱动力下降，线性恢复到原有的状态；而临界转换模式具有灾变特征，转换之后极难恢复，需要通过更强烈的人工干预技术来实现。

5 湖泊生态系统服务长期变化

基于长江中下游湖泊沉积物多指标的分析结果，一些研究者对过去 100 年来的生态系统服务变化进行了评估[31-33]。总体而言，1950 年以来长江经济带湖泊流域调节服务开始呈下降趋势；1990 年以来快速下降，与供给服务需求呈反向变化关系。近 70 年来，人类长期不合理的资源利用方式使得长江经济带湖泊流域的调节和供给两类服务呈现出明显的“此消彼长”的动态权衡特征，并可能进一步影响未来生态系统服务的供应。更进一步，通过对不同服务指标的边界条件设定，苏彦瑜等[34]分别从环境安全和社会基础两个方面提出了构建湖泊流域社会-生态系统安全操作空间的思路。该研究发现在长江中下游地区，一些重要湖泊流域的水质、空气质量、沉积物质量、土壤稳定性等调节服务指标，目前已经超越了环境上限，处于危险状态；而清洁能源、产业创新的社会基础完成度则相对较低，这揭示出该区域可持续发展的短板。

湖泊生态系统服务长期变化过程和安全操作空间

研究，有利于公众和管理部门理解环境上限和社会基础之间交互复杂的关系，可为区域生态系统的管理和决策提供宏观控制-预警的依据。由于生态系统服务间权衡效应的存在，进行生态系统管理时应多方考虑相关利益群体，以及当下与未来服务的综合得失情况，促进人类福祉的可持续发展。

6 基于历史视角的湖泊保护与治理对策

湖泊治理与保护是一个复杂系统工程，需综合考虑多种自然和人为驱动要素的生态效应及其长效机制。本文以史为鉴，从过去环境演变的视角，提出如下长江经济带湖泊保护及治理对策。

（1）对我国西南地区的清洁水源，应采取因地制宜的保护对策。我国西南地区众多的小型高山湖泊生态环境总体响应大气沉降的影响，但生态系统仍保持很好的完整性。对此类湖泊应该以保护为主，以维持清洁水源和多样化的生境为目标，一方面可以通过控制区域大气污染物排放，减少污染物沉降对湖泊营养物的输入；另一方面尽量避免人类活动（如牧业、森林砍伐等）对流域植被和土壤稳定性的直接干扰。我国西南地区重要深水湖泊（如抚仙湖、泸沽湖等），尽管目前水质环境尚好，但环境演化趋势表明在人类活动影响下，这些湖泊已经出现早期富营养化迹象。此类湖泊应保护与治理兼顾；维持优质淡水资源，需要从源头上控制流域侵蚀强度，减少面源污染；同时，通过入湖河流湿地缓冲带，削减入湖营养负荷，以确保高标准的水质目标。此外，应避免对外来物种的引入，对其导致的生态风险应加以科学评估。

（2）科学设定湖泊治理目标和阶段性效果评估标准。生态和环境本底的确定，为湖泊环境治理目标的科学设定提供了重要参考。长江中下游湖泊水体TP浓度的本底值在50 μg/L左右，这表明在对该区域富营养湖泊治理中，如果将水体TP的削减目标设定过低是不切实际的。通过沉积记录进行的多生物尤其是水生植物指标的分析，可为生态系统修复提供拟自然的生物群落结构信息。考虑到修复目标的合理性，可依据湖泊历史演化过程设定阶段性修复目标。此外，由于同一区域或流域内不同湖泊生态演化存在群落结构的差异，针对具体湖泊的生态修复，还需要建立“因湖施策、一湖一策”的治理修复方案。目前的生态环境本底研究，主要针对长江中下游典型湖泊；而对于淮河流域和西南地区的富营养湖泊，这方面的研究尚未开展，有必要对其进行环境本底的普查，科学指导湖泊生态系统的修复。

（3）逐步恢复河湖水力联系，重塑自然河湖水系格局。河湖系统间的联通，有助于增加水体的交换强度，缩短湖泊换水周期，增强水体自净能力，从而维持较好的水质状况；同时，河湖联通可建立河流与湖泊间的生态廊道，促进河湖间的水生生物交流[35]。湖泊历史过程的重建，揭示了1950年以来长江中下游地区强烈围垦和建闸筑坝等人类活动引起的浅水湖泊自然水文节律的改变。这使得绝大多数湖泊从原本好的江河湖水力连通性，变成了相对静水状态的水库型湖泊，最终导致了富营养化的发生和生物群落的演替。尊重自然地理历史原貌，逐步构建畅通开放的水生态网络，恢复良性的河湖湿地水系格局，应是当务之急。建议以史为鉴，在流域尺度上，通过河流疏导、生态清淤、水生和湿地植被恢复等工程并举，构建以湖泊、运河、骨干河流为主体的河-湖-湿地水力连通格局，逐步恢复流域河湖水系统保护体系，达到水环境和生态质量改善和提升的目的。

（4）扼守系统突变红线，用突变理论研究指导湖泊生态系统修复。湖泊生态系统临界转换具有突然性、后果危害性、恢复滞后性等特点[28]，甚至造成更大尺度上的级联负效应[36]。因此，古湖沼研究揭示的临界转换早期预警信号，有利于对生态系统的管理，避免灾难性事件的发生。在长江经济带，一些重要湖泊的生态系统已经历了从清水态向浊水态的转变，

藻类暴发呈现常态化。对这些湖泊的治理，仅通过流域控源截污已经无法实现，必须考虑生态系统结构调整的修复策略。特别是那些正在逼近突变临界点的湖泊，如果得不到及时治理，后果将更严重。在这种情况下，可以通过临界转换发生前的“闪烁”现象诊断，及时提出保护和治理的应对措施。面对长江经济带湖泊较高的突变风险，建议将突变早期预警信号纳入监测预警体系，指导湖泊管理、保护和治理。

（5）严控不当的人类活动，实现多尺度的协同管理。近20年来，我国针对滇池、太湖、巢湖等富营养湖泊开展了治理，在污染控制、水质达标、湖滨湿地景观改造等方面取得一定成效，但大湖面生态问题并没有得到缓解。为了从根本上解决流域内水环境问题，必须开展流域之间的统一协作管理，从整体上把握关键问题和解决问题，协调好地方各级政府及部门之间的关系，严格控制流域内不合理的人类活动，包括毁林、工业和生活废水的排放，尤其是农业活动中的化肥使用。同时，也要加强对环境系统的监测，把握各环境系统的动态变化过程，及时采取有效的措施遏制生态系统恶化，并制定区域湖泊健康生态系统长效维持管理方案。

致谢 感谢中国科学院南京地理与湖泊研究所王苏民、张科对文稿提供的宝贵建议！

参考文献

1 杨桂山, 马荣华, 张路, 等. 中国湖泊现状及面临的重大问题与保护策略. 湖泊科学, 2010, 22(6): 799-810.

2 Cui P, Zhu Y Y, Han Y S, et al. The 12 May Wenchuan earthquake-induced landslide lakes: Distribution and preliminary risk evaluation. Landslides, 2009, 6(3): 209-223.

3 Hu Z J, Anderson N J, Yang X D, et al. Climate and tectonic effects on Holocene development of an alpine lake (Muge Co, SE margin of Tibet). The Holocene, 2016, 26(5): 801-813.

4 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社, 1998.

5 Yin H F, Liu G R, Pi J G, et al. On the river-lake relationship of the middle Yangtze reaches. Geomorphology, 2007, 85(3-4): 197-207.

6 Wang R, Dearing J A, Doncaster C P, et al. Network parameters quantify loss of assemblage structure in human-impacted lake ecosystems. Global Change Biology, 2019, 25(11): 3871-3882.

7 Qin B Q, Paerl H W, Brookes J D, et al. Why Lake Taihu continues to be plagued with cyanobacterial blooms through 10 years (2007-2017) efforts. Science Bulletin, 2019, 64(6): 354-356.

8 王洪铸, 刘学勤, 王海军. 长江河流-泛滥平原生态系统面临的威胁与整体保护对策. 水生生物学报, 2019, 43(S1): 157-182.

9 袁刚, 茹辉军, 刘学勤. 2007—2008年云南高原湖泊鱼类多样性与资源现状. 湖泊科学, 2010, 22(6): 837-841.

10 孔繁翔, 马荣华, 高俊峰, 等. 太湖蓝藻水华的预防、预测和预警的理论与实践. 湖泊科学, 2009, 21(3): 314-328.

11 Kong L Y, Yang X D, Kattel G R, et al. The response of cladocerans to recent environmental forcing in an alpine lake on the SE Tibetan Plateau. Hydrobiologia, 2017, 784(1): 171-185.

12 Hu Z J, Anderson N J, Yang X D, et al. Catchment-mediated atmospheric nitrogen deposition drives ecological change in two alpine lakes in SE Tibet. Global Change Biology, 2014, 20(5): 1614-1628.

13 Hu Z J, Yang X D, Anderson N J, et al. The landscape-atmosphere continuum determines ecological change in alpine lakes of SE Tibet. Ecosystems, 2018, 21(5): 839-851.

14 Li Y L, Gong Z J, Xia W L, et al. Effects of eutrophication and fish yield on the diatom community in Lake Fuxian, a deep oligotrophic lake in southwest China. Diatom Research, 2011, 26(1): 51-56.

15 Wang R, Dearing J A, Langdon P G, et al. Flickering gives

early warning signals of a critical transition to a eutrophic lake state. Nature, 2012, 492(7429): 419-422.

16 Zheng W X, Wang R, Zhang E L, et al. Complex relationship between the diversity and stability of chironomid assemblages in the recent sediments of two large alpine lakes in SW China. Science of The Total Environment, 2019, 684: 705-714.

17 刘园园, 陈光杰, 施海彬, 等. 星云湖硅藻群落响应近现代人类活动与气候变化的过程. 生态学报, 2016, 36(10): 3063-3073.

18 Zhang Q H, Dong X H, Yang X D, et al. Hydrologic and anthropogenic influences on aquatic macrophyte development in a large, shallow lake in China. Freshwater Biology, 2019, 64(4): 799-812.

19 Chen X, Yang X D, Dong X H, et al. Environmental changes in Chaohu Lake (southeast, China) since the mid 20th century: The interactive impacts of nutrients, hydrology and climate. Limnologica - Ecology and Management of Inland Waters, 2013, 43(1): 10-17.

20 Zhang Q H, Dong X H, Chen Y W, et al. Hydrological alterations as the major driver on environmental change in a floodplain Lake Poyang (China): Evidence from monitoring and sediment records. Journal of Great Lakes Research, 2018, 44(3): 377-387.

21 Chen X, McGowan S, Xu L, et al. Effects of hydrological regulation and anthropogenic pollutants on Dongting Lake in the Yangtze floodplain. Ecohydrology, 2016, 9(2): 315-325.

22 Bennion H, Battarbee R. The European Union water framework directive: Opportunities for palaeolimnology. Journal of Paleolimnology, 2007, 38(2): 285-295.

23 Yang X D, Anderson N J, Dong X H, et al. Surface sediment diatom assemblages and epilimnetic total phosphorus in large, shallow lakes of the Yangtze floodplain: Their relationships and implications for assessing long-term eutrophication. Freshwater Biology, 2008, 53(7): 1273-1290.

24 Zhang E L, Bedford A, Jones R, et al. A subfossil chironomid-total phosphorus inference model for lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(17): 2125-2132.

25 Dong X H, Yang X D, Chen X, et al. Using sedimentary diatoms to identify reference conditions and historical variability in shallow lake ecosystems in the Yangtze floodplain. Marine and Freshwater Research, 2016, 67(6): 803-815.

26 董旭辉, 羊向东. 湖泊生态修复基准环境的制定: 古生态学面临的机遇. 湖泊科学, 2012, 24(6): 974-984.

27 张清慧. 长江中下游浅水湖泊水生植被演替与驱动机制. 北京: 中国科学院大学, 2019.

28 Scheffer M, Bascompte J, Brock W A, et al. Early-warning signals for critical transitions. Nature, 2009, 461: 53-59.

29 Zhang K, Dong X H, Yang X D, et al. Ecological shift and resilience in China's lake systems during the last two centuries. Global and Planetary Change, 2018, 165: 147-159.

30 Xu M, Wang R, Dong X H, et al. A palaeolimnological perspective to understand regime-shift dynamics in two Yangtze-basin lakes. Biology Letters, 2019, 15(11): 20190447.

31 Dearing J A, Yang X D, Dong X H, et al. Extending the timescale and range of ecosystem services through paleoenvironmental analyses, exemplified in the lower Yangtze basin. PNAS, 2012, 109(18): 6808-6809.

32 Xu M, Dong X H, Yang X D, et al. Using palaeolimnological data and historical records to assess long-term dynamics of ecosystem services in typical Yangtze shallow lakes (China). Science of the Total Environment, 2017, 584: 791-802.

33 Lin Q, Zhang K, Shen J, et al. Integrating long-term dynamics of ecosystem services into restoration and management of large shallow lakes. Science of the Total Environment, 2019, 671: 66-75.

34 苏彦瑜, 董旭辉. “安全公正空间”框架在区域环境管理

中的应用——以太白湖流域为例. 地球环境学报, 2020, DOI: 10.7515/JEE192038.

35 McGowan S, Leavitt P R, Hall R I, et al. Interdecadal declines in flood frequency increase primary production in lakes of a northern river delta. Global Change Biology, 2011, 17(2): 1212-1224.

36 Rocha J C, Peterson G, Bodin Ö, et al. Cascading regime shifts within and across scales. Science, 2018, 362: 1379-1383.

Past Environmental Changes and Management Suggestions for Lakes in the Yangtze River Economic Belt

YANG Xiangdong[1*] DONG Xuhui[2] CHEN Xu[3] WANG Rong[1] WANG Qian[1] LIN Qi[1] XU Min[1]

（1 State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;

2 School of Geographical Sciences, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China;

3 School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China ）

Abstract Lakes in the Yangtze River Economic Belt are mainly distributed in the Hengduan Mountain area in Southwest China and the flood plain area of the Yangtze-Huaihe River Basin in East China. The high spatial variability of natural environment and economic development have rendered the ecological and environmental problems of these lakes. Comprehensive improvement of the lake environment and their ecological states are important for regional development. In the absence of long-term monitoring data, past environmental changes based on lake sediments, also termed as paleolimnological studies, can provide historical information for the protection and restoration of these lakes. This study revealed better water quality in alpine lakes than low-altitude ones in southwest China, while the worst water quality in the shallow lakes in the Jianghuai region. Furthermore, based on paleolimnological analysis, this study provided a long-term perspective to reveal the evolution characteristics and the mechanisms responding to the changes in climate, hydrology and nutrition in different lakes of the two areas in the past century. Such research also elucidated the reasons of the lake degradation in recent years, and exhibited the advantage of paleolimnological studies in defining reference conditions for ecosystem restoration, management evaluation, community structure optimization during aquatic vegetation restoration, early warning signals of ecosystem critical transition, and ecological safety assessment. Aiming at above environmental problems faced by lakes in different regions, the study put forward several targeted measures for their protection and restoration.

Keywords the Yangtze River Economic Belt, lake environmental change, ecosystem degradation, process and mechanism, strategy of protection and restoration

*Corresponding author



羊向东　中国科学院南京地理与湖泊研究所研究员、博士生导师。主要从事第四纪古环境、古湖沼、湖泊生态系统演化研究。中国海洋与湖沼学会、江苏省古生物学会理事；曾任国际硅藻学会理事。曾主持中国科学院知识创新工程重要方向项目、科学技术部重点研发计划、国家自然科学基金重点项目等项目。在湖泊硅藻数据库研究和环境要素定量重建、西南古季风气候演化、高山湖泊和长江中下游湖泊古生态、湖泊生态系统突变等方面取得了重要研究成果，发表SCI论文150余篇。获国家自然科学奖二等奖1项、江苏省科技进步奖一等奖1项；获中国科学院优秀教师奖、朱李月华优秀教师奖。
E-mail: xdyang@niglas.ac.cn

YANG Xiangdong　Professor of Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences (CAS). His mainly research covers the Quaternary paleoenvironment, paleolimnology, and lake ecosystem evolution. He has successively served as a committee member of the Chinese Society of Oceanology and Limnology, the International Diatom Society, and the Paleontological Society of Jiangsu Province. Yang Xiangdong has been funded by CAS, the National Key R&D Program of China, and the Key Project of National Natural Science Foundation of China. He has been focusing and internationally acknowledged of his study on the lake diatom database and quantitative reconstruction of environmental parameters, climate evolution of southwest monsoon, paleoecology of lakes from alpine and the middle and lower reaches of the Yangtze River, and abrupt change of lake ecosystem. He has been published more than 150 SCI-indexed papers. Yang Xiangdong has won a second prize of the National Natural Science Award, a first prize of Science and Technology Progress Award of Jiangsu Province, and an Outstanding Teacher Award of CAS, an Outstanding Teacher Award of Zhu Liyuehua. E-mail: xdyang@niglas.ac.cn

■责任编辑：文彦杰

参考文献（双语版）

1 杨桂山, 马荣华, 张路, 等. 中国湖泊现状及面临的重大问题与保护策略. 湖泊科学, 2010, 22(6): 799-810.
Yang G S, Ma R H, Zhang L, et al. Lake status, major problems and protection strategy in China. Journal of Lake Sciences, 2010, 22(6): 799-810. (in Chinese)

2 Cui P, Zhu Y Y, Han Y S, et al. The 12 May Wenchuan earthquake-induced landslide lakes: Distribution and preliminary risk evaluation. Landslides, 2009, 6(3): 209-223.

3 Hu Z J, Anderson N J, Yang X D, et al. Climate and tectonic effects on Holocene development of an alpine lake (Muge Co, SE margin of Tibet). The Holocene, 2016, 26(5): 801-813.

4 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社, 1998.
Wang S M, Dou H S. Lakes in China. Beijing: Science Press, 1998. (in Chinese)

5 Yin H F, Liu G R, Pi J G, et al. On the river-lake relationship of the middle Yangtze reaches. Geomorphology, 2007, 85(3-4): 197-207.

6 Wang R, Dearing J A, Doncaster C P, et al. Network parameters quantify loss of assemblage structure in human-impacted lake ecosystems. Global Change Biology, 2019, 25(11): 3871-3882.

7 Qin B Q, Paerl H W, Brookes J D, et al. Why Lake Taihu continues to be plagued with cyanobacterial blooms through 10 years (2007-2017) efforts. Science Bulletin, 2019, 64(6): 354-356.

8 王洪铸, 刘学勤, 王海军. 长江河流-泛滥平原生态系统面临的威胁与整体保护对策. 水生生物学报, 2019, 43(S1): 157-182.
Wang H Z, Liu X Q, Wang H J. The Yangtze River-floodplain ecosystem: Multiple threats and holistic conservation. Acta Hydrobiologica Sinica, 2019, 43(S1): 157-182. (in Chinese)

9 袁刚, 茹辉军, 刘学勤. 2007—2008年云南高原湖泊鱼类多样性与资源现状. 湖泊科学, 2010, 22(6): 837-841.
Yuan G, Ru H J, Liu X Q. Fish diversity and fishery resources in lakes of Yunnan Plateau during 2007-2008. Journal of Lake Sciences, 2010, 22(6): 837-841. (in Chinese)

10 孔繁翔, 马荣华, 高俊峰, 等. 太湖蓝藻水华的预防、预测和预警的理论与实践. 湖泊科学, 2009, 21(3): 314-328.
Kong F X, Ma R H, Gao J F, et al. The theory and practice of prevention, forecast and warning on cyanobacteria bloom in Lake Taihu. Journal of Lake Sciences, 2009, 21(3): 314-328. (in Chinese)

11 Kong L Y, Yang X D, Kattel G R, et al. The response of cladocerans to recent environmental forcing in an Alpine Lake on the SE Tibetan Plateau. Hydrobiologia, 2017, 784(1): 171-185.

12 Hu Z J, Anderson N J, Yang X D, et al. Catchment—mediated atmospheric nitrogen deposition drives ecological change in two alpine lakes in SE Tibet. Global Change Biology, 2014, 20(5): 1614-1628.

13 Hu Z J, Yang X D, Anderson N J, et al. The landscape-atmosphere continuum determines ecological change in alpine lakes of SE Tibet. Ecosystems, 2018, 21(5): 839-851.

14 Li Y L, Gong Z J, Xia W L, et al. Effects of eutrophication and fish yield on the diatom community in Lake Fuxian, a deep oligotrophic lake in southwest China. Diatom Research, 2011, 26(1): 51-56.

15 Wang R, Dearing J A, Langdon P G, et al. Flickering gives early warning signals of a critical transition to a eutrophic lake state. Nature, 2012, 492(7429): 419-422.

16 Zheng W X, Wang R, Zhang E L, et al. Complex relationship between the diversity and stability of chironomid assemblages in the recent sediments of two large alpine lakes in SW China. Science of The Total Environment, 2019, 684: 705-714.

17 刘园园, 陈光杰, 施海彬, 等. 星云湖硅藻群落响应近现代人类活动与气候变化的过程. 生态学报, 2016, 36(10): 3063-3073.

Liu Y Y, Chen G J, Shi H B, et al. Responses of a diatom community to human activities and climate changes in Xingyun Lake. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(10): 3063-3073. (in Chinese)

18 Zhang Q H, Dong X H, Yang X D, et al. Hydrologic and anthropogenic influences on aquatic macrophyte development in a large, shallow lake in China. Freshwater Biology, 2019, 64(4): 799-812.

19 Chen X, Yang X D, Dong X H, et al. Environmental changes in Chaohu Lake (southeast, China) since the mid 20th century: The interactive impacts of nutrients, hydrology and climate. Limnologicas, 2013, 43(1): 10-17.

20 Zhang Q H, Dong X H, Chen Y W, et al. Hydrological alterations as the major driver on environmental change in a floodplain Lake Poyang (China): Evidence from monitoring and sediment records. Journal of Great Lakes Research, 2018, 44(3): 377-387.

21 Chen X, McGowan S, Xu L, et al. Effects of hydrological regulation and anthropogenic pollutants on Dongting Lake in the Yangtze floodplain. Ecohydrology, 2016, 9(2): 315-325.

22 Bennion H, Battarbee R. The European Union water framework directive: Opportunities for palaeolimnology. Journal of Paleolimnology, 2007, 38(2): 285-295.

23 Yang X D, Anderson N J, Dong X H, et al. Surface sediment diatom assemblages and epilimnetic total phosphorus in large, shallow lakes of the Yangtze floodplain: Their relationships and implications for assessing long-term eutrophication. Freshwater Biology, 2008, 53(7): 1273-1290.

24 Zhang E L, Bedford A, Jones R, et al. A subfossil chironomid-total phosphorus inference model for lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(17): 2125-2132.

25 Dong X H, Yang X D, Chen X, et al. Using sedimentary diatoms to identify reference conditions and historical variability in shallow lake ecosystems in the Yangtze floodplain. Marine and Freshwater Research, 2016, 67(6): 803-815.

26 董旭辉, 羊向东. 湖泊生态修复基准环境的制定: 古生态学面临的机遇. 湖泊科学, 2012, 24(6): 974-984.

Dong X H, Yang X D. Establishing reference condition for lake restoration: The opportunity for palaeoecology. Journal of Lake Sciences, 2012, 24(6): 974-984. (in Chinese)

27 张清慧. 长江中下游浅水湖泊水生植被演替与驱动机制. 北京: 中国科学院大学, 2019.

Zhang Q H. Succession and driving mechanism of aquatic vegetation in shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019. (in Chinese)

28 Scheffer M, Bascompte J, Brock W A, et al. Early-warning signals for critical transitions. Nature, 2009, 461: 53-59.

29 Zhang K, Dong X H, Yang X D, et al. Ecological shift and resilience in China's lake systems during the last two centuries. Global and Planetary Change, 2018, 165: 147-159.

30 Xu M, Wang R, Dong X H, et al. A palaeolimnological perspective to understand regime-shift dynamics in two Yangtze-basin lakes. Biology Letters, 2019, 15(11): 20190447.

31 Dearing J A, Yang X D, Dong X H, et al. Extending the timescale and range of ecosystem services through paleoenvironmental analyses, exemplified in the Lower Yangtze Basin. PNAS, 2012, 109(18): E1111-E120.

32 Xu M, Dong X H, Yang X D, et al. Using palaeolimnological data and historical records to assess long-term dynamics of ecosystem services in typical Yangtze shallow lakes (China). Science of the Total Environment, 2017, 584-585: 791-802.

33 Lin Q, Zhang K, Shen J, et al. Integrating long-term dynamics of ecosystem services into restoration and management of large shallow lakes. Science of the Total Environment, 2019, 671: 66-75.

34 苏彦瑜, 董旭辉. “安全公正空间”框架在区域环境管理中的应用——以太白湖流域为例. 地球环境学报, 2020, 11(5): 562-573.

Su Y Y, Dong X H. Application of “safe and just operating space” framework in regional environmental management: A case study of Taibai Lake catchment. Journal of Earth Environment, 2020, 11(5): 562-573. (in Chinese)

35 McGOWAM S, Leavitt P R, Hall R I, et al. Interdecadal declines in flood frequency increase primary production in lakes of a northern river delta. Global Change Biology, 2011, 17(2): 1212-1224.

36 Rocha J C, Peterson G, Bodin Ö, et al. Cascading regime shifts within and across scales. Science, 2018, 362(6421): 1379-1383.